

基于模式识别的矿山复杂巷道快速建模方法研究

——以棉花坑铀矿床为例

沈玉众, 施林峰, 杨江坤

(中核第四研究设计工程有限公司, 石家庄 050021)

摘要: 在处理复杂巷道三维模型的构建时,传统的中线法和腰线法均面临工作量大、调整次数多、巷道实体不容易闭合等问题。基于多边形模式识别理论提出一种复杂巷道快速建模方法。首先,对实测巷道的腰线进行整理使得线段闭合且不存在重复线段,然后在平面上对巷道包围的空间进行 Delaunay 三角剖分,生成一系列的三角形,据此生成巷道中心线,再根据巷道顶面控制点与中心点的位置关系生成一系列辅助线,最后根据三维空间的这些线生成 DTM(数字地形建模)面,形成巷道实体。采用面向对象的程序设计与编程方法,以棉花坑铀矿床—100 m 中段巷道模型绘制验证了复杂巷道快速建模方法的可行性。结果表明,采用该方面建模方便、快捷,能够很好地解决复杂巷道建模周期长的难题,对快速构建全矿井数字化模型具有重要意义。

关键词: 模式识别; 巷道建模; Voronoi 图

中图分类号: TD85 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)03-0234-07

数字矿山(digital mine)是随着计算机信息技术、互联网技术、通信技术等现代科技的发展而兴起的,是数字地球、数字城市的延伸,从而实现数字化矿山生产和安全管理,建设智能化生产体系。其目的就是实现矿山生产与安全管理的数字化和三维可视化,从而建设数字化、信息化、自动化和智能化的矿山体系^[1-5]。

三维模型是数字矿山的基础,目前,矿体建模主要通过不同地质剖面的矿体轮廓线相连接,建模方法已经非常成熟。巷道建模目前尚没有一种便捷的方法。巷道设计工作量繁重,且大部分工作为重复性劳动。广义的巷道包括井筒、斜坡道、中段及分段巷道、硐室等地下工程。针对不同巷道类型,目前主要有直接绘制法、中线法和腰线法^[6-8]。直接绘制法主要用于井下硐室等比较简单的模型;中线法则根据巷道中心线结合巷道断面来生成巷道实体,该方法生成的模型与最终实测的巷道模型往往不相一致,多用于巷道设计阶段;腰线法则根据矿山实测的腰线结合断面特征建立巷道实体,其建立的模型与矿山巷道真实形态贴合得最近,在矿山生产实际中应用最为广泛。然而,现有的腰线法

对于简单形状的巷道适应性较好,当巷道分支符合较多且形状趋于复杂性,往往需要多次手动加入控制线或采取其他手段调整,而且处理步骤较为复杂。模式识别技术^[9-11]是人工智能的基础技术,随着信息科学和人工智能的快速发展,模式识别被应用于图像分析与处理、语音识别、声音分类、通信、计算机辅助诊断、数据挖掘等领域。针对矿山领域,复杂巷道三维建模的一个难点就是如何找到巷道的出口,传统通过手工调整的方法效率较低。因此,将模式识别手段应用于矿山模型的建模可以更加智能化地实现复杂巷道的快速建模,从而在一定程度上对全矿井的数字化具有重要意义。

因此,现通过对巷道多边形进行模式识别,进一步辨识出复杂巷道的侧帮和出口,为巷道快速建模提供一种便捷的方法。同时,以中核棉花坑铀矿床—100 m 中段巷道为实际工程背景,绘制并验证基于模式识别的复杂巷道快速建模方法的可行性和便捷性。

1 复杂巷道快速建模理论

1.1 Delaunay 三角剖分

三角剖分^[12]将二维实数域上有限点集合假设

收稿日期: 2023-11-09

作者简介: 沈玉众(1985—),男,江苏滨海人,高级工程师,硕士,研究方向为铀矿山开采设计及岩土工程数值分析;施林峰(1983—),男,浙江慈溪人,高级工程师,研究方向为铀矿山井巷及地下工程研究与设计;通信作者杨江坤(1997—),男,河北邢台人,助理工程师,硕士,研究方向为矿山开采设计及数值分析。

为 V ,边 e 是点与点构成的封闭线段, E 为 e 的集合。 V 的一个三角剖分 $T=(V,E)$ 是一个平面图 G ,该平面图满足条件:①除了端点,平面图中的边不包含点集中的任何点;②没有相交边;③平面图中所有的面都是三角面,且所有三角面的合集是散点集 V 的凸包,如图1所示。

假设 E 中的一条边 e (两个端点为 a,b),若存在圆经过 a,b 两点且圆内部含集合 V 中任何其他的点,则称 e 为Delaunay边。如果集合 V 的一个三角剖分 T 只包含Delaunay边,那么该三角剖分称为Delaunay三角剖分。Delaunay三角剖分必须符合两个重要的准则^[13]:空外接圆原则和三角形最小角最大化原则。三角形最小角最大化是指两个相邻的三角形构成凸四边形的对角线,在相互交换后,6个内角的最小角不再增大,如图2所示。

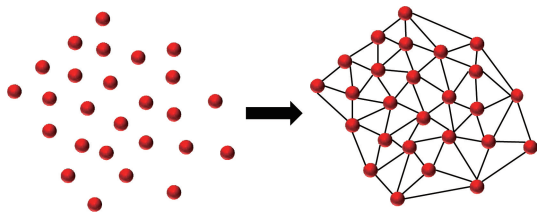


图1 三角剖分

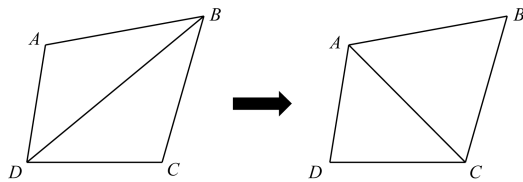


图2 根据三角形最小角最大进行局部优化

1.2 Voronoi 图

Voronoi图是一组由相邻点连接线的垂直平分线相连所组成的连续多边形。Voronoi图是Delaunay三角剖分的对偶图,其根据点集划分区域到点的距离最近,在地理学、气象学等领域应用较为广泛,如在障碍物点集中,规避障碍寻找最佳路径。

在巷道底部完成Delaunay三角剖分后,需要采用Voronoi图找到巷道中心线及辅助控制点才能完成巷道顶面控制线的创建。生成它的方法有很多,比较有名的有分治算法、扫描线算法、增量法等。但利用Delaunay三角剖分生成Voronoi图的算法是最快的。其基本原理是在生成Delaunay三角网后,找到每个三角形外接圆的圆心,最后连接相邻三角形的外接圆圆心,形成以三角形顶点为生成元的多边形网(图3)。

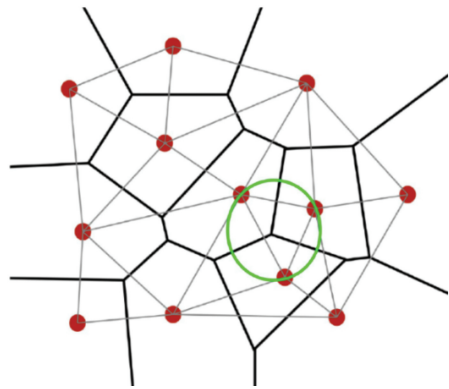


图3 根据Delaunay三角网生成Voronoi图

1.3 多边形模式识别

模式识别是指对研究事物或现象的各种形式信息进行处理,从而对事物或现象进行表征、辨别、分类和解释。巷道腰线多边形经过Delaunay三角剖分后,将生成的三角形的边线中点按照一定顺序进行连接,获得巷道中心线。当采用计算机来实现时,需要考虑两个问题:①巷道出口识别及交叉口处理;②嵌套多边形识别。具体如下。

1.3.1 巷道出口识别^[14]

从几何学上讲,三角形一共有4种剖分方法(图4),图4(a)~图4(c)都是平行于三角形某一条边,图4(d)则分叉形成3个方向的剖分。在实际的巷道建模三角形剖分(图5)中,共有Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ3种不同类型的三角形,其中Ⅰ、Ⅱ型对应图4(a)~图4(c),Ⅲ型对应图4(d)。

在巷道建模过程中,要标记出新剖分的三角形属于那种类型,以此来识别巷道中心线的节点类型。从图5可以看出:Ⅰ类三角形有两条外部边,一条内部边,其中一条外部边的中点为巷道中心线的端点;Ⅱ类三角形有一条外部边,两条内部边,两条内部边的中点连线构成巷道中心线的一部分;Ⅲ类三角形3条边均为内部边,其中每条内部边的中点均为一条巷道中心线的端点,是向3个方向延伸的出发点。其中,巷道建模中关键的是巷道中心线起

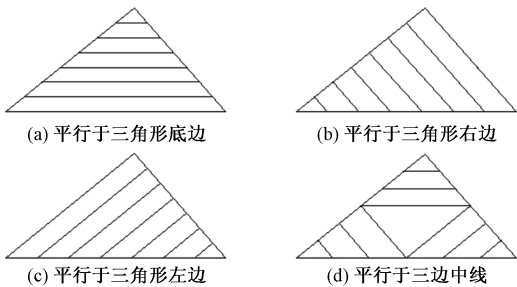


图4 三角形剖分类型

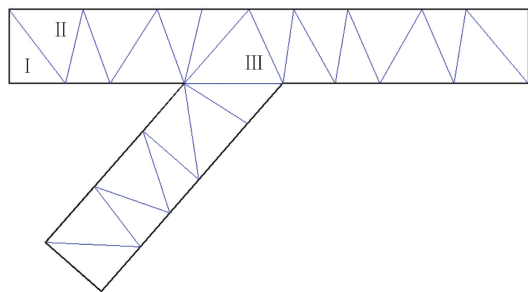


图5 三角形类型

点的识别,即 I 类型三角形中外部边中的那一边作为巷道的出口(图 6 中的 AB 边和 BC 边)。一般来说,实测巷道边时,AB 边比 BC 边要长(腰线测点较多),据此可以根据两条边的长短来确定那条边时巷道的出口。然而,这种方法存在缺陷,一旦 BC 边大于 AB 边时,根据算法,会将 BC 边作为巷道出口,与实际并不相符。基于此,提出一种新的识别方法:首先根据图 5 作出 Voronoi 图(图 7)。图中红色 Voronoi 边表示其在巷道内部,求取 Voronoi 图中包含在巷道多边形内部的 Voronoi 边,继而获得 Voronoi 边与巷道多边形内部三角形边的交点,连接各交点就形成了巷道中心线(图 7)。根据 AB 边和 BC 边与中心线的位置关系,夹角大者即为巷道的出口,从图中可以看出,AB 边与中心线为 90° ,而 BC 边与中心线夹角为 0° ,因此 AB 边被识别为巷道出口,与实际工程相符合。

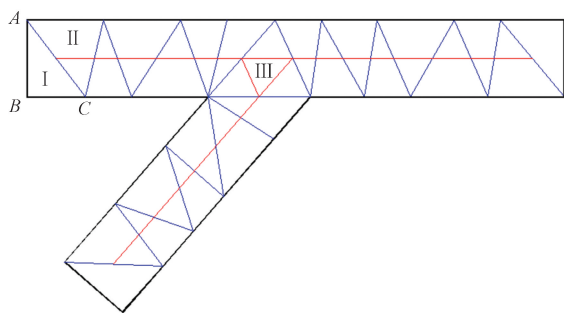


图6 巷道侧帮与出口识别

1.3.2 识别嵌套多边形的关系^[15]

矿山巷道是根据开采需要进行设计的,因此,巷道在平面上的形状往往不是一根直线或简单的分叉,当巷道在空间上闭合时,其中心线就形成闭合多边形,此时,巷道的腰线就形成内外两个多边形,在巷道生成时就需要识别哪些点是真正在巷道内部,即图 8 中蓝色部分。一般而言,当点位于闭合多边形内部时,就认为它是巷道空间,但当闭合多边形出现嵌套时,只有处于内部多边形外面和外部

多边形里面的部分才是巷道的真实部分。

在嵌套多边形模式识别中,其判别的基本原理是:从某点发射射线与多边形相交,统计交点个数,当数目为奇数时,该点位于多边形内部,当数目为偶数时,该点位于多边形外部(图 9)。对于巷道建模来说,当三角形的质心点发出的射线与巷道腰线的交点为奇数时,该三角网保留参与巷道 DTM(数字地形建模)面生成,当交点个数为偶数时则不再参与巷道 DTM 面生成。

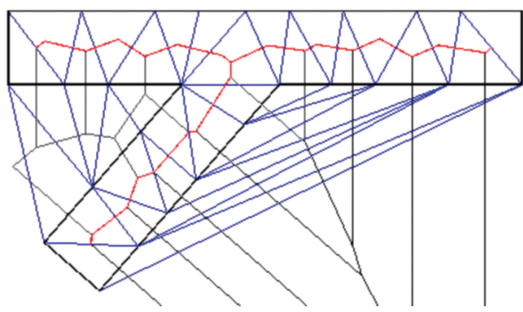


图7 多边形巷道 Voronoi 图

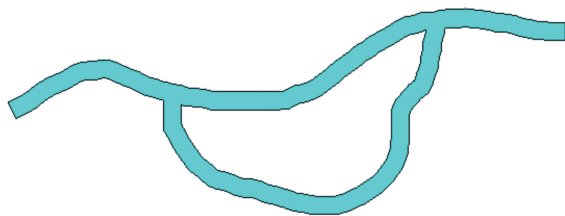
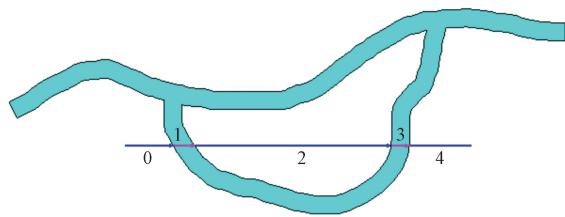


图8 巷道嵌套示意图



0、1、2、3、4 分别表示图示空间上射线与巷道相交的交点个数,当交点为奇数时,算法判断从该点开始参与巷道 DTM 面生成,当交点个数为偶数时,从该点开始则不再参与巷道 DTM 面生成

图9 巷道内外部识别原理图

2 复杂巷道快速建模步骤

2.1 巷道多边形三角剖分

根据矿山实测巷道腰线,首先进行必要清理,然后基于 Delaunay 三角剖分进行处理。具体实施步骤如下:①遍历散点,计算得到点集包容盒,将点集凸壳的初始三角形并放入三角形链表;②将所有散点依次嵌入,在三角形链表中查找外接圆包含插

入点的三角形,删除对应三角形的公共边,将插入点和对应三角形的全部顶点连接起来,从而完成一个点在 Delaunay 三角形链表中的嵌入;③根据优化准则对局部新形成的三角形进行优化,将形成的三角形放入 Delaunay 三角形链表;④循环执行上述第②步,直到所有散点嵌入完毕。

基于散点的构网算法理论严密性和唯一性较好,所得到的网格可以满足空圆特性,同时由于每个点是逐个插入的,后续增加新点,无需重新构网,只需对新点所影响范围进行局部处理。同时,每个点的删除和移动也可进行动态处理。但在实际工程应用中,该构网算法对于地面的地性线和特征线难以引入,同时点的密度较大时构建速度较慢,如果点集范围为非凸区域或存在内环,则会产生非法三角形。

为了对上述算法进行弥补,同时着重提高算法的计算效率,可以对网格中空圆特性进行适当修改简化,即采用基于边的构网方法。该方法的具体实施步骤如下:①依据给出地性线和特征线,形成控制边链表;②在控制边链表中选择某一线段作为初始基边,找出与初始基边两端点距离之和最小的点。确定该点后,以其为顶点,以初始基变为边,向外扩展一个仅满足空椭圆特性的三角形放入三角形链表中;③对控制边链表所有的线段进行步骤②循环,分别向外扩展;④将新形成的三角形的边作为基边,依次形成新的控制边链表,对控制边链表所有的线段进行步骤②循环,再次向外扩展,当所有三角形无法向外扩展停止。

2.2 巷道断面控制线

2.2.1 巷道中心线识别^[16]

在建立 Delaunay 三角网的基础上,生成 Voronoi 图,具体步骤为:①首先利用离散点生成三角网,构建完成 Delaunay 三角网,将每个离散点和新构建的三角形进行编号,记录每个三角形对应的离散点;②对三角形的外接圆圆心进行计算和记录;③对所有三角形链表进行遍历,找到与当前三角形 TriP 三条边相邻的 3 个三角形 TriA、TriB 和 TriC;④如果存在,把寻找到的三角形外心与 TriP 外心进行连接,记录到 Voronoi 边链表,如果不存在,计算最外边的中垂线射线,将其记录到 Voronoi 边链表;⑤遍历所有后,每个 Voronoi 边都被找到,然后根据边描绘出 Voronoi 图;⑥对 Voronoi 的边与三角形交点进行计算,交点为巷道的中心线;⑦根据端部三角形的两个外部边与巷道中心线之

间的夹角,对巷道出口进行识别;然后,对巷道出口外部边中线与巷道中心线之间建立连接,最终形成完整的巷道中心线。

2.2.2 控制线生成^[17]

1) 巷道断面的控制点

巷道控制点的坐标与断面形状相关,如图 10 所示,以铀矿山常用三心拱为例进行分析。

一般来讲,根据图 10 中 P_0 、 P_2 、 P_4 、 P'_2 、 P'_4 5 个点即可生成三星拱的基本形状,但这种方法相对比较粗略,而且在生成 DTM 面时,拱顶尖角的视觉效果并不理想。为了更准确对拱顶的三维形态进行表征,选取 8 个控制点(图 10 中 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P'_1 、 P'_2 、 P'_3 、 P'_4),其中, P_1 、 P'_1 两点位于 P_0 点两侧处,这种方法生成的拱顶 DTM 效果与实际更为贴近。

根据计算,图 10 中巷道断面半径为 $B/2$ (B 为整个巷道宽度),外部大圆直径 $R=0.691\ 898B$,外部小圆直径 $r=0.260\ 957B$,巷道断面的直墙高度 h_4 ,因此各点坐标为 $P_1(l_1, h_1)$ 、 $P_2(l_2, h_2)$ 、 $P_3(l_3, h_3)$ 、 $P_4(l_4, h_4)$ 、 $P'_1(-l_1, h_1)$ 、 $P'_2(-l_2, h_2)$ 、 $P'_3(-l_3, h_3)$ 、 $P'_4(-l_4, h_4)$ 。各线段长度计算公式为

$$l_1 = R \sin(\theta/4) \quad (1)$$

$$h_1 = h_0 - [R - R \cos(\theta/4)] = h_4 + B/3 + R \cos(\theta/4) - R \quad (2)$$

$$l_2 = R \sin \theta \quad (3)$$

$$h_2 = h_0 - [R - R \cos \theta] = h_4 + B/3 + R \cos \theta - R \quad (4)$$

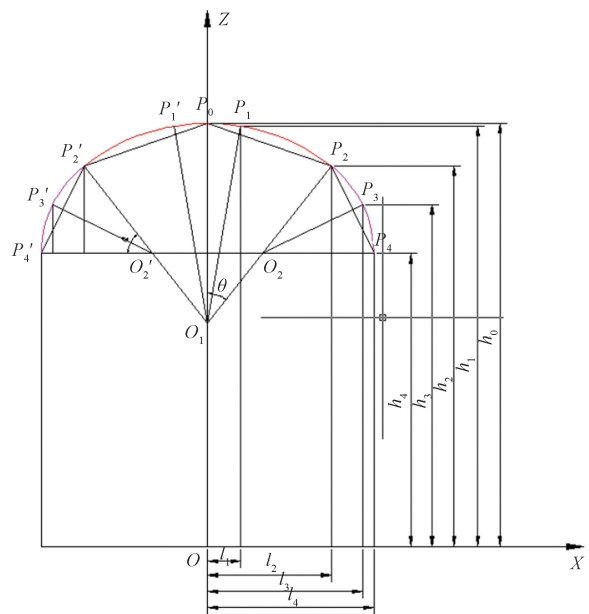


图 10 三心拱顶面控制点坐标计算示意图

$$l_3 = (B/2 - r) + r\sin(\alpha/2) = B/2 + r\sin(\alpha/2) - r \quad (5)$$

$$h_3 = h_4 + r\cos(\alpha/2) \quad (6)$$

$$l_4 = B/2 \quad (7)$$

对各点坐标进行计算后,根据计算结果依次赋值到三角形对应控制点坐标,对相邻三角形对应点进行连接,最终得到巷道拱顶控制线。

2) 巷道拱高识别

在实际矿山的巷道中,由于施工技术(未采用预裂爆破)及巷道设计(巷道坡度)要求,其拱高沿巷道走向往往是不同的,在建模过程中就需要调整不同地段巷道拱顶高程,通过手工调整工作量极大,属于低效率重复劳动。这里提出采用导线点(矿山实测点)为腰线赋高程。图11所示为巷道及实测导线点,各点的标示值为该点相对于巷道水平的高度,图中巷道水平Z值为零。将各测点连接形成导线,对导线加密点,点的高程值根据前后测点进行线性插值,巷道多边形上的各点高程值,根据导线上各点(含加密点)进行确定。完成上述操作后的巷道多边形如图12所示。

2.3 巷道实体生成

在巷道控制线生成后,在巷道多边形内部再一次进行三角剖分(根据控制线上各点),完成拱顶与侧帮DTM表面的生成,与此同时完成底板DTM表面生成(根据实测高程),通过对顶帮DTM面与底板DTM合并完成巷道实体的创建。

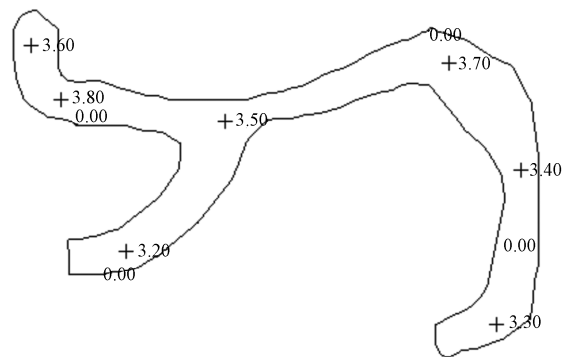
3 工程验证

3.1 工程背景

中核锦原铀业有限公司棉花坑矿井于1969年设计,1970年开工建设,1984年底验收,1985年初正式投产,一直延续生产至今,目前开拓延伸到-150 m中段。棉花坑矿井矿体形态复杂,在浅部呈尖灭再现或边幕式分布,较大的矿体呈似脉状、扁豆状,小矿体一般为小透镜状、豆荚状。矿体厚度为1~3 m,最厚6 m,平均厚度2.42 m。棉花坑矿井采矿方法以上向水平分层干式充填法为主,个别边角矿体采用浅孔留矿法。矿床经过多年开采,浅部尚有残矿有待回收,准确快速地建立巷道模型对于矿井数字化、准确回收浅部矿体具有重要意义。

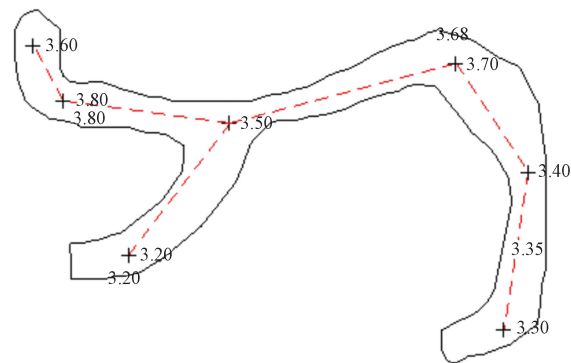
3.2 方法验证

根据矿山提供的原始中段平面图进行清理。这里给出了棉花坑矿床-100 m中段平面图中巷道较为复杂的部分(图13)。从图中可以看出,巷道形



数字为各点的相对高程标示值,是该点相对于巷道水平的高度,图中巷道水平为零;正负号表示点相对于巷道水平的方向,正号表示向上,负号表示向下

图11 中段巷道及实测导线点



数字为各点的相对高程标示值,是该点相对于巷道水平的高度,图中巷道水平为零;正负号表示点相对于巷道水平的方向,正号表示向上,负号表示向下

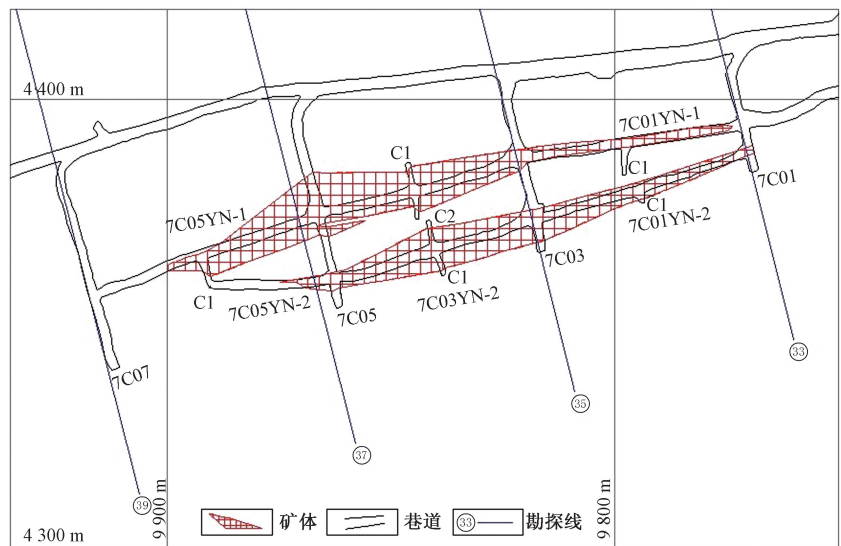
图12 导线生成与腰线赋值

状不规则且分支复合较多,具有代表性,通过实现该区段巷道的快速建模,就能够实现整个矿山实测巷道的快速建模,为建设数字化矿井、浅部残矿回采及深部开拓提供准确的参考依据。

根据提供的图纸进行清理,仅保留巷道部分,然后进行Delaunay三角剖分(这一步后台进行),剖分后的三角网及Voronoi图生成的巷道中心线如图14(b)所示,然后设定巷道断面参数,最后生成的巷道如图14(d)所示。该方法方便快捷,一旦巷道多边形整理完成后就可迅速生成,为矿山三维巷道快速生成带来极大便利。同时图15给出了一100 m中段部分巷道施工阶段的现场图片,可以看出巷道断面成形较好,同时巷道稳定,为安全开挖生产提供了基本保障。

4 结论

(1)针对传统腰线建模法对复杂巷道适应性较差的问题,提出多边形模式识别,对巷道多边形进



7C03、7C05 代表穿脉巷道及编号;7C05YN-1、7C05YN-2 表示 7C05 与穿脉巷道相连的沿脉巷道及编号;4 300、4 400、9 900、9 800 m 为坐标

图 13 -100 m 中段平面图(局部)

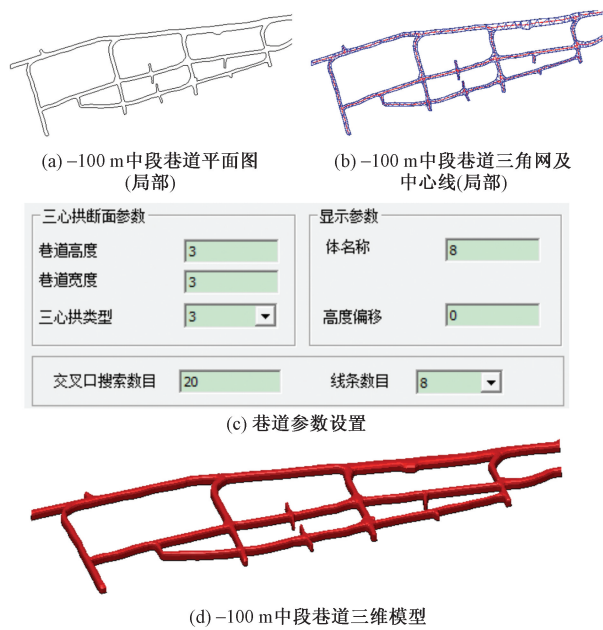


图 14 三维巷道模型建立

行 Delaunay 三角剖分,并通过 Voronoi 图与三角形生成巷道中心线,完成巷道出口的识别及巷道交叉口处的正确处理,解决了在复杂巷道建模中巷道出口容易出错的难题。

(2)针对分支复合巷道中存在嵌套时巷道建模容易出现错误的难题,通过对巷道嵌套多边形进行识别,计算三角形质心点与巷道多边形交点数目,根据交点数目奇偶性剔除掉在内部多边形内的三角形,排除其对最终模型的影响。

(3)针对矿山工程中巷道拱高存在变化的实际



图 15 -100 m 中段巷道施工现场

情况,通过实测点对腰线进行赋高程,实现坡度变化条件下的巷道快速建模。

(4)采用 VC++ 语言进行算法实现,通过棉花坑铀矿床-100 m 中段巷道进行工程验证,结果表明,巷道三维实体模型生成速度极快,为建立全矿井数字化模型,推进浅部残矿回收、深部开拓的推进提供了一种有效的技术手段。

参考文献

[1] 吴立新. 数字地球、数字中国与数字矿区[J]. 矿山测量, 2000(1): 6-9.

[2] 吴立新, 殷作如, 钟亚平. 再论数字矿山: 特征、框架与关键技术[J]. 煤炭学报, 2003, 28(1): 1-7.

[3] 谭得健, 徐希康, 张申. 浅谈自动化、信息化与数字矿山[J]. 煤炭科学技术, 2006, 34(1): 23-27.

[4] 陈小辉. 凡口矿井下工程巷道模型的构建[J]. 采矿技术, 2014, 14(5): 49-51.

- [5] 熊玖琦, 刘星. 基于支持向量机的顾北煤矿北一矿区三维地质模型构建[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(19): 8194-8199.
- [6] 王聪. 巷道三维自动建模技术及可视化研究[D]. 济南: 山东科技大学, 2020.
- [7] 马钰栋, 唐君辉. 一种基于Dynamo的复杂地质体参数化三维建模方法[J]. 科技和产业, 2021, 21(12): 284-291.
- [8] 贺奇峰. 某矿2306回风巷腰线标定方法探究[J]. 中国矿山工程, 2019, 48(3): 46-48.
- [9] 胡彦玲, 周鹤. 基于大数据分析的激光图像模式识别研究[J]. 激光杂志, 2023, 44(9): 120-124.
- [10] 王琳. 巷道顶板稳定性分类及锚固支护机理研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2006.
- [11] 王廷军. 矿山搜寻机器人视觉技术及井下矿工识别理论的研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2014.
- [12] 台森, 王佩贤, 姜东. 利用Delaunary三角网优化CORS网构的方法研究[J]. 测绘科学, 2011, 36(5): 134-135.
- [13] 蔡美峰, 李角群, 杨志军. 基于三角形剖分算法建立三维巷道模型的研究[J]. 中国矿业, 2011, 20(5): 75-79.
- [14] 李功权, 蔡祥云. 一种基于约束三角网的道路中心线的提取方法[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2013, 10(4): 75-79.
- [15] 周智勇, 陈建宏, 汤其旺, 等. 巷道自动成图及三维建模[J]. 测绘科学, 2010, 35(4): 182-183.
- [16] 罗小飞, 余琳莉. 地理国情道路中心线提取算法研究[J]. 城市勘测, 2015(5): 65-67.
- [17] 孙中, 卢秀山, 田茂义. 矿山巷道3维建模算法研究及实现[J]. 测绘学报, 2009, 38(3): 250-254.

Research on Rapid Modeling Method of Mine Complex Roadway Based on Pattern Recognition: Taking Section of the Cotton Keng Uranium Deposit

SHEN Yuzhong, SHI Linfeng, YANG Jiangkun

(The Fourth Research and Design Engineering Corporation of CNNC Institute for Research and Design of Uranium and Metallurgy, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: When dealing with the construction of complex roadway 3D model, the traditional midline method and waist line method are faced with many problems, such as heavy workload, many times of adjustment and difficult closure of roadway entity. Based on polygon pattern recognition theory, a rapid modeling method for complex roadway was proposed. Firstly, the measured roadway's lumbar line was sorted to make the line segment closed without repeating line segment. Then, the space surrounded by roadway was Delaunay triangulated on the plane to generate a series of triangles, and the roadway center line was generated accordingly. Next, a series of auxiliary lines are generated according to the position relationship between the control point and the center point of the roadway top surface. Finally, DTM (digital terrain model) planes are generated according to these lines in three-dimensional space to form the roadway entity. By using object-oriented programming and programming method, the feasibility of the fast modeling method of complex roadway is verified by drawing the roadway model of —100 m middle section of the cotton Keng uranium deposit. The results show that it is convenient and fast to adopt this aspect of modeling, and can solve the problem of long modeling cycle of complex roadway, which is of great significance to quickly establish the digital model of the whole mine.

Keywords: pattern recognition; roadway modeling; Voronoi diagram